

TRABALHO DE FORMATURA PMT 593

Recuperação de moldes poliméricos utilizados em colagem de peças cerâmicas sanitárias

(Desenvolvido na Incepa)

Aluno: Sidney Nakao Nakahodo

Orientador: Prof. Dr. Douglas Gouvêa

Co-orientadora: Profa. Dra. Wang Shu Hui

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Douglas Gouvêa, pelo estímulo contínuo, amizade e contagiante idealismo.

À Professora Doutora Wang Shui Hui, pelas valiosas discussões e apoio na caracterização do molde.

À INCEPA, especialmente ao engenheiro Alessandro Ferrari, pela oportunidade de aprendizado e pela confiança depositada.

Ao Paulo Jorge Brazão Marcos, pelo auxílio na realização de diversos experimentos.

Às técnicas responsáveis pelo Laboratório de Processos Cerâmicos, Andréa Hesz e Carina Oushima, pela paciência e auxílio com os equipamentos.

Ao Laboratório de Caracterização Tecnologia do PMI, na pessoa do professor Henrique Kahn, pelas análises no microscópio eletrônico de varredura.

Ao Augusto Morita, pelas dicas “computacionais”.

Aos meus amigos formandos metalurgistas e aos companheiros da primeira turma de engenheiros de materiais, pelo sofrimento, alegria, incertezas e expectativas compartilhados durante todo o curso.

"All that happens to us, including our humiliations, our misfortunes, our embarrassments, all is given to us as raw material, as clay, so that we may shape our art"

Jorge Luis Borges

Para Tuko, Lúcia, Liana e Lilian

1. INTRODUÇÃO	6
1.1. PRESSURE CASTING	8
1.2. PRODUÇÃO.....	10
1.3. FILTRO ¹¹	12
1.3.1. Fluxo em meio poroso.....	13
1.3.2. Escoamento de um fluido através de um meio poroso (permeabilidade) .	14
1.3.3. Filtragem e pressure casting.....	18
1.5. ULTRA-SOM.....	20
1.5.1. A cavitação	21
1.5.2. Os geradores.....	23
2. OBJETIVOS	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS	26
3.2. POROSIMETRIA DE MERCÚRIO	29
3.3. GRANULOMETRIA	31
4. RESULTADOS	32
4.1. NATUREZA DAS PARTÍCULAS	32
4.2. AVALIAÇÃO DA LIMPEZA POR ULTRA-SOM.....	33
4.3. POROSIMETRIA DE MERCÚRIO.....	35
4.4. ANÁLISE DO RESÍDUO.....	37
4.5. ANÁLISE DO TRATAMENTO DE ULTRA-SOM A PARTIR DAS MICROGRAFIAS	40
5. VIABILIDADE ECONÔMICA DO TRATAMENTO	44
6. CONCLUSÕES	45
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
8. BIBLIOGRAFIA	46

1. Introdução

Um dos métodos de produção de peças cerâmicas sanitárias mais empregados na indústria é o processo conhecido como *slip casting*, ou colagem por barbotina. Segundo esse método, a barbotina - uma suspensão aquosa de argilas, quartzo e feldspato contendo defloculantes - é adicionada a um molde poroso e, após a absorção do líquido pelas paredes do mesmo, forma-se uma "casca" cerâmica sólida, configurando-se na peça final desejada. Ao final, o excesso de líquido é retirado e a peça é extraída (fig.1)

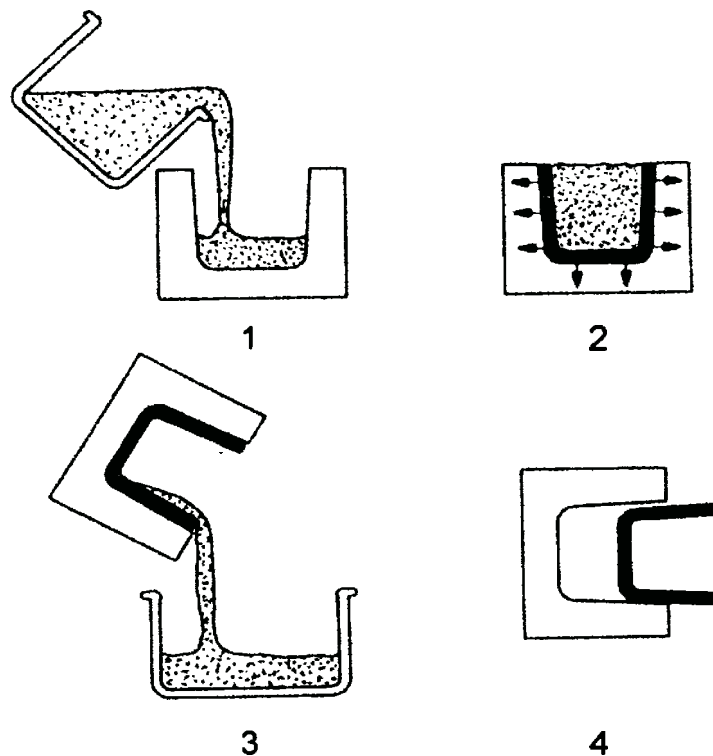


Fig. 1 – Esquema de produção por colagem por barbotina: (1) adição, (2) colagem, (3) extração do excesso e (4) retirada da peça.

Os desenvolvimentos técnicos mais recentes têm levado à alternativas no processo com o intuito de elevar a produtividade. Dentre as inovações surgidas nos últimos anos, destaca-se o *pressure casting*, responsável por uma diminuição dos custos de aproximadamente 16 a 18% nos custos, quando comparado aos métodos tradicionais (1).

Segundo Ates (2), o tempo de vida de um molde de gesso no processo de colagem de barbotina tradicional é de 70 a 90 colagens, realizadas 1 vez ao dia, com 20 a 30 peças por trabalhador por dia produzidas no mesmo período. Com a tecnologia do *pressure casting*, o tempo de processamento é muito menor, com 15 a 20 colagens por ciclo de 8 horas, perfazendo de 120 a 160 peças por operador por dia, produzindo 3 vezes ao dia, 7 dias por semana e o molde podendo ser utilizado em até 20.000 colagens. De acordo com Rado (6), as vantagens do *pressure casting* sobre a colagem tradicional de barbotina podem ser resumidas da seguinte forma:

- aumento de produtividade devido à realização de colagens em tempos muito menores;
- eliminação de água de maneira mais eficiente, após colagem;
- menor tempo de secagem;
- peças mais densas;
- maior resistência a verde;
- menor contração durante secagem e queima;
- maior reprodutibilidade dimensional da peça;
- menor distorção da peça durante a queima;
- eliminação de "pin-holes" nas peças vidradas

Além disso, o número de moldes necessário para a produção das peças é muito menor, uma vez que não há necessidade da secagem dos mesmos, a exemplo do que ocorre com o gesso. Assim, diminui-se consideravelmente a necessidade de espaço na planta.

1.1. Pressure Casting

A principal diferença entre a colagem tradicional e o *pressure casting* reside na aplicação de uma pressão com o intuito de reduzir o tempo de colagem baseando-se no processo de filtração sob pressão. O conceito do *pressure casting* não é completamente novo: em 1917 (1) já havia patentes com aplicações similares e desde então o processo vem sendo utilizado pela indústria.

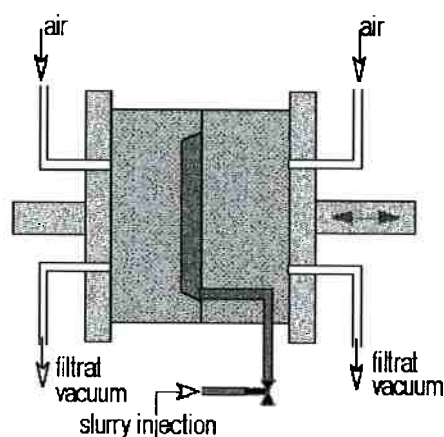
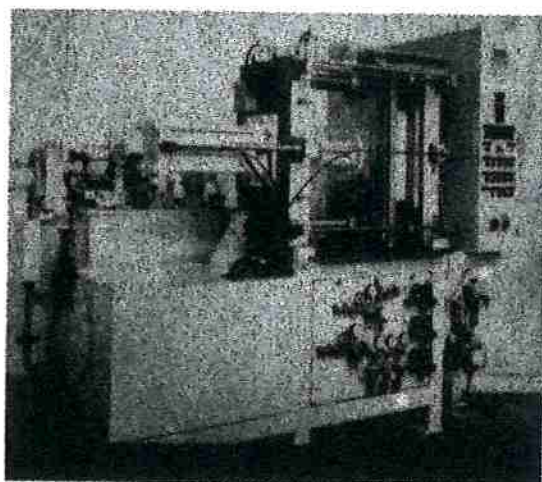


Fig. 2 – Foto (ref.1) e esquema (ref. 11) de uma máquina de colagem com pressão

A figura 2 apresenta um exemplo de máquina de colagem sob pressão. Uma unidade hidráulica separada tanto pode ser acoplada a essa estrutura quanto ser posicionada separadamente nas proximidades, a qual será utilizada no fechamento dos moldes e na obtenção da pressão de colagem. Uma bomba diafragma auto-aspirante, hidráulicamente atuante, fornece a barbotina ao interior do molde.

Quando trabalhada na configuração típica, a peça é removida por meio de vácuo. Após o preenchimento e a amenização de eventuais “costuras” com uma esponja úmida, aplicada pelo próprio operado, a peça é retirada para secagem.

Para determinadas peças ou situações, trabalha-se com moldes na posição horizontal ao invés de vertical. Nesses casos, a máquina deve se equipada com um aparato hidráulico pivotante, o que permite que seja posicionados numa configuração ideal para a produção e teste. Os moldes podem ser projetados com cavidades simples, no caso de grande peças, ou múltiplas cavidades, no caso de artigos menores.

A máquina opera com um ajuste máximo da força de fechamento com 65 toneladas. As maiores superfícies que pode ser obtida é de aproximadamente 1000 a 1200 cm³, sendo parcialmente limitada pela paralelização das duas metades. O projeto da máquina também limita a área total do molde a um tamanho de 500 mm x 600 mm, adequando-a para a produção de uma gama variada de artigos, desde peças bastante simples até elementos mais complexos (1).

1.2. Produção

O sistema de produção em escala, para peças de grandes dimensões como lavatórios e colunas, podem utilizar um conjunto de moldes acoplados em série, nos quais a barbotina é bombeada simultaneamente para interior de cada uma das partes, com pressão entre 8 e 12 bar.

Após a finalização da colagem, as peças são extraídas individualmente e colocadas para secar. A água no interior dos moldes é retirada através de um processo de limpeza a ar (fig. 3), deixando-os imediatamente disponíveis para nova utilização.

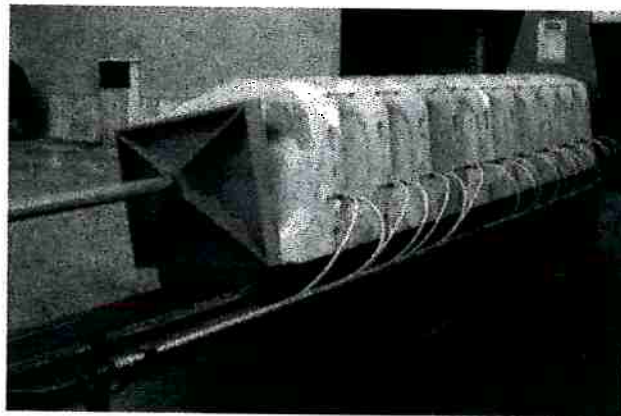


Fig. 3 – Moldes posicionados em série e as respectivas mangueiras que fornecem ar para a secagem

A figura 4 mostra uma visão detalhada dos moldes em diferentes ângulos. O ciclo de produção inteiro leva aproximadamente de 15 a 20 minutos com uma série de 15 moldes. Quando a barbotina é aquecida, pode-se reduzir ainda mais o tempo do ciclo.



Fig. 4 – Molde apresentado em três diferentes ângulos

Tanto os sistemas com alta quanto os de média pressão utilizam moldes com uma vida útil muito mais longa que os modelos de gesso tradicionais, os quais acarretam custos comparativamente mais elevados, em função de uma série de fatores: esse moldes desgastam-se rapidamente, devem ser secados freqüentemente e necessitam de grandes áreas para a secagem quando não estão em uso. Além disso, podem causar flutuações na qualidade devido a variação do teor de umidade no interior do molde e do grau de acoplamento entre as partes do molde.

Todos esses inconvenientes são reduzidos ou eliminados com a utilização das técnicas de *pressure casting* em moldes poliméricos. Uma vez que a secagem não se faz necessária, pode-se posicionar as máquinas em qualquer locação no interior da planta. Com isso, o tempo de expedição e o trabalho de mudança de um modelo para outro é significativamente reduzido.

O *pressure casting* também possibilita uma retirada de água mais eficiente das peças. Um menor teor de umidade da parte colada minimiza o risco de deformação com a secagem, permitindo tempos de secagem menores e menor

susceptibilidade a tensões que possam levar a deformações ou surgimento de fraturas.

A qualidade das peças também é substancialmente elevada, com a erosão da superfície dos moldes virtualmente eliminada. As partes dos moldes tem uma superfícies muito mais suave e, acima de tudo, apresentam uma consistência bastante grande. Cantos e bordas, por exemplo, mantêm-se com dimensões constantes, o que significa que a última peça colada em um molde será tão boa quanto a primeira.

Espessuras variáveis também podem ser formadas de maneira muito melhor que a colagem tradicional, resultando numa menor retração durante a secagem e queima, além de promover uma alta estabilidade das propriedades mecânicas do corpo queimado.

Em resumo, a qualidade da produção passa a depender não mais da habilidade do fundidor, passando a ser caracterizada, essencialmente, pelas máquinas e tipo de moldes empregados.

1.3. Filtro¹¹

O filtro é um dispositivo poroso que tem como finalidade a retenção de partículas sólidas suspensas num meio fluido, que pode ser líquido ou gasoso.

No estudo de filtro, faz-se necessário o conhecimento de dois materiais envolvidos, i.e., meio poroso e fluido. Em geral, as características exigidas em um filtro são:

- resistência mecânica;
- retenção de partículas sólidas acima do tamanho específico;
- permeabilidade (capacidade de passar um dado volume de fluido com viscosidade especificada através de um corpo com área e espessura unitária sob um dado gradiente de pressão);
- durabilidade.

A resistência mecânica de um filtro deve ser suficiente para manter a integridade do filtro durante a filtração, especialmente se ela ocorrer sob pressão ou vibração.

A retenção de partículas sólidas pode ser determinada pela passagem de partículas de tamanho conhecido através de um meio poroso. Outro método largamente utilizado na avaliação da retenção de partículas é o "bubble test" para o tamanho de poro.

A permeabilidade do filtro é diretamente proporcional ao tamanho da partícula retida, ou seja, quanto menor o tamanho da partícula retida, menor é a permeabilidade do filtro. Por outro lado, a espessura do filtro também afeta a permeabilidade, pois altas espessuras dificultam a passagem do fluido.

Em geral, o controle da porosidade é crítico, procurando-se obter uma dimensão dos poros dentro de uma faixa estreita, reduzindo a distribuição do tamanho de partículas.

1.3.1. Fluxo em meio poroso

Os poros em um sistema poroso podem ser interconectados ou não-interconectados, i.e., aberto e fechado, respectivamente. Os poros interconectados são os que permitem a passagem do fluido. O fluxo de um fluido é possível somente se parte dos espaços forem interconectados. Pode-se chamar de espaço de porosidade efetivo à porosidade interconectada. Assim, o meio poroso é caracterizado por diferentes parâmetros geométricos.

O primeiro parâmetro a ser considerado é a fração de vazios em relação ao volume total de porosidade (ϵ) sendo expressa em fração de 1 (μm) ou em porcentagem. A medição da porosidade pode ser feita por vários métodos, dentre os quais destaca-se a porosimetria de mercúrio, que será vista mais adiante.

Os poros interconectados contêm uma superfície e o fluido, ao passar pelo meio poroso, deve entrar em contato com esta superfície. A área da superfície específica interna (S) define uma quantidade geométrica que caracteriza a porosidade do meio poroso.

Os poros inter-conectados são canais, cujas seções transversais podem ter diferentes formatos e tamanhos. Considerando a geometria mais simples (seção circular), há uma variação significativa da dimensão. À essa dimensão da seção transversal da porosidade está associada uma distribuição de tamanho de poros. Normalmente os métodos de determinação de distribuição de tamanho de poros considera poros circulares.

Finalmente, pode-se considerar os canais de passagem de um meio poroso em relação à direção do fluxo do fluido. Os canais podem não estar dispostos paralelamente à direção do fluxo e o caminho percorrido pelo fluido é maior do que a espessura do meio poroso. A relação entre o caminho percorrido pelo fluido através do meio poroso e o caminho mais curto é denominado de tortuosidade, ou seja, a relação entre o comprimento médio dos canais e a espessura do meio poroso.

1.3.2. Escoamento de um fluido através de um meio poroso (permeabilidade)

Considere-se escoamento de um fluido através de um filtro poroso. Para baixas diferenças de pressão $\Delta P = P_1 - P_2$ e baixos valores da vazão Q de gás, verifica-se que a vazão e a diferença de pressão correlacionam-se segundo a Lei de Darcy:

$$Q = (p/\mu) A (\Delta P/e) \quad (1)$$

Onde:

Q = vazão do gás na mistura gasosa;

p = coeficiente de permeabilidade do fluxo viscoso;

A = seção reta do filtro;

ΔP = diferença de pressão responsável pelo escoamento;

μ = viscosidade da mistura gasosa;

e = espessura do filtro

Dividindo-se a vazão Q pela seção reta A chega-se à expressão da velocidade superficial V_0 do fluido:

$$V_0 = Q/A \quad (2)$$

Outra maneira de se apresentar a Lei de Darcy é a seguinte:

$$\Delta P/e = \mu V_0/\rho \quad (3)$$

Pela equação 6, verifica-se que o escoamento do fluido através do meio poroso sofre uma perda de carga ($\Delta P/e$) devido às resistências viscosas oferecidas à passagem do mesmo através do meio poroso.

Tal perda de carga será tanto maior quanto maior for a velocidade do escoamento do fluido. Aumentando-se a permeabilidade específica α , tem-se uma diminuição da perda de carga $\Delta P/e$. ρ é também chamado de coeficiente de permeabilidade viscosa α :

$$\alpha = \rho \quad (4)$$

Assim a equação 5 pode ser escrita:

$$\Delta P/e = \mu V_0/\rho q \quad (5)$$

A Lei de Darcy aplica-se para escoamentos laminares. Assim, definindo-se o número de Reynolds para o leito associado ao filtro por:

$$R_e = (\rho V_0) / \mu (1-\varepsilon)/S_0 \quad (6)$$

Onde:

ε = fração de vazios ou porosidade total;

S_0 = superfície específica das partículas por unidade de volume das partículas.

A lei de Darcy vale até valores de $Re = 2$. Para valores $Re \geq 2$ deve-se aplicar a equação geral descrita pela equação 5.

No caso de escoamento laminar, vale a equação conhecida por equação de Blake-Kozeny para relacionar velocidade superficial com superfície específica e fração de vazios de porosidade. Tem-se:

$$V_0 = (1/4,2) (\Delta P / e\mu) (\varepsilon^3 / S_v^2) \quad (7)$$

Sendo:

$$S_v = S_0 (1 - \varepsilon) \quad (8)$$

Onde:

S_v = área da superfície total por unidade de volume do leito (ou do corpo poroso)

Relacionando-se as duas equações 5 e 8 chega-se a:

$$\alpha = (1/4,2) (\varepsilon^3 / S_v^2) \quad (9)$$

Pela equação 9 verifica-se que o coeficiente de permeabilidade viscoso (α) depende do sólido, a saber, da porosidade (ε) e da superfície específica (S_v). Outra expressão para α é dada pela equação 10:

$$\alpha = c\varepsilon^3/\tau S_v^2 \quad (10)$$

Onde:

c = constante que depende da forma dos poros (geralmente vale 0,8);

τ = tortuosidade é a relação entre o comprimento do trajeto percorrido pelo fluido e a espessura da parede.

1.3.3. Filtragem e pressure casting

Uma vez sendo o *pressure casting* uma operação basicamente de filtragem, diversas equações de filtração podem ser aplicadas. A equação seguinte (11) apresenta a espessura do corpo em um filtro:

$$D_s = \sqrt{\frac{pt}{W_s} + \left(\frac{W_f D_f}{W_s}\right)^2} - \frac{W_f D_f}{W_s} \quad (11)$$

D_s = espessura do corpo;

p = pressão de filtração;

t = tempo de filtragem;

W_s = resistência à filtragem do corpo;

W_f = resistência do filtro;

D_f = espessura do filtro

Sendo:

Para moldes especiais, com alta porosidade, os dois fatores relacionados à resistência do filtro (W_f) podem ser desprezados. Portanto, a espessura do corpo torna-se função apenas da pressão de filtração, tempo de filtração e resistência do corpo e equação (11) é simplificada à:

$$D_s = \sqrt{\frac{pt}{W_s}} \quad (12)$$

Disso, conclui-se que a espessura do corpo, para qualquer tempo de colagem, está diretamente relacionada com a pressão de colagem. À medida que a pressão aumenta, entretanto, a pressão hidráulica no molde também se eleva.

Da mesma forma, os materiais de construção e a tolerância, assim como os custos, tornam-se crescentemente críticos. Isso leva à conclusão de que diferentes sistemas de manufatura são necessários para diferentes aplicações. Quando pressões médias (3,5 a 4 bar) são aplicadas na produção de peças sanitárias, um aumento na produtividade pode ser alcançada com um baixo capital empregado. Por exemplo, no gráfico na figura 5, uma rápida melhora no tempo de colagem pode ser obtida à medida que a pressão é elevada de 0,25 a 4 bar. Assim, para a formação de uma espessura de 8,5 mm, o tempo é reduzido de 80 para 21 minutos. O aumento da pressão acima de 4 bar continuará a reduzir o tempo de deposição a uma taxa continuamente decrescente (fig. 5)

O grande fator limitante ao emprego de pressões maiores (40 a 60 bar), até pouco tempo, decorria da baixa resistência dos moldes de gesso. Com o desenvolvimento dos moldes em resina polimérica, tornou-se viável a utilização do *pressure casting* com elevadas pressões. Duas companhias que vêm desenvolvendo essa tecnologia e as têm aplicado com sucesso à produção de sanitários são a Netzch e Dorst, ambas alemãs.

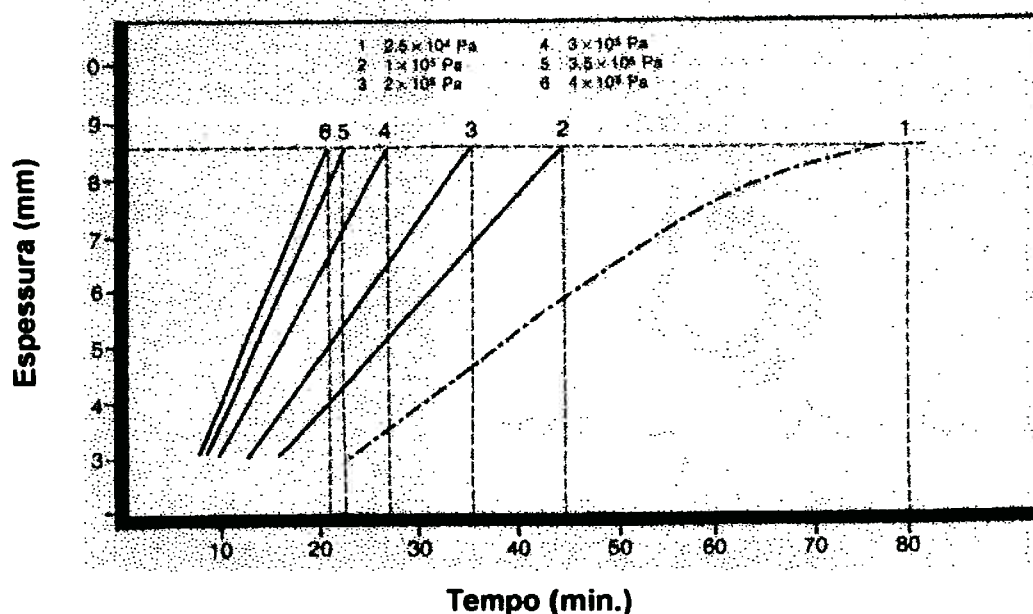


Fig. 5 – A formação da camada colada em função da pressão de colagem

1.5. Ultra-som

O termo ultra-som geralmente se refere à perturbações acústicas em um faixa de freqüências acima de 18 kHz e que se estende a níveis maiores que 2 MHz, sendo o ultra-som de “baixa-freqüência” a faixa que compreende as freqüências entre 18 e 90 kHz e o “mega-som” a perturbação acústica entre 600 kHz e 2 MHz.

A energia ultra-sônica possui muitos usos e as aplicações do ultra-som estendem-se à campos tão distintos como a medicina, a indústria eletrônica e a engenharia. Um dos usos do ultra-som na manufatura e processamento modernos é a limpeza de objetos imersos em líquidos. Por exemplo, é bastante conhecido o fato de que objetos no interior de soluções aquosas podem ser limpos pela aplicação de energia ultra-sônica à água. Os típicos transdutores, dispositivos que, no presente caso, convertem sinais elétricos em ultra-sons, são feitos de materiais como piezoelétricos, cerâmicas ou magnetostrictivos (ligas de ferro e

alumínio ou ferro e níquel que se contraem ou expandem sob influência de um campo magnético), os quais oscilam com frequência igual à tensão ou corrente aplicada. Esses transdutores transmitem energia ultra-sônica ao líquido o qual, uma vez “energizado” interage com o objeto, criando a limpeza desejada.

1.5.1. A cavitação

A interação entre o líquido energizado e o objeto ocorre por meio de um fenômeno conhecido por cavitação. Por esse termo compreende-se a formação de cavidades no líquido e seu subsequente colapso, o qual é acompanhado por intensos choques hidráulicos.

Se um líquido é exposto à intensa vibrações ultra-sônicas, freqüentemente podem-se ver bolhas de gás formarem-se no interior do líquido. A maior parte dos líquidos, a menos que sejam especialmente tratados, contém gases dissolvidos cuja quantidade depende da pressão e temperatura do líquido. Sob condições normais, o gás encontra-se finamente disperso tanto na fórmula de moléculas em posições vazias das estrutura *quasi-cristalina* do líquido quanto sob a forma de bolhas de dimensões microscópicas. Tais bolhas constituem as partes fracas dentro do líquido e o limite de resistência é determinado pela maior bolha presente.

Se as ondas sonoras em um líquido têm intensidade suficiente para produzir pressões de amplitude maiores que a pressão hidrostática, a pressão líquida resultante torna-se negativa durante a fase dilatacional. Essa condição pode ser produzida na água com intensidades médias de som maiores que $1/3 \text{ watt/cm}^3$.

Nos estudos realizados por Rosenberg e Lange (9) sugerem que a cavitação possui três diferentes aspectos:

- a) lenta desgaseificação
- b) ressonância linear de bolhas de gás
- c) colapso não-linear de bolhas de vapor

Em um líquido gaseificado exposto a um forte campo sonoro, dois fenômenos parecem acontecer. Por exemplo, um líquido submetido a uma frequência de 60 kcps (10^3 ciclos por segundo), a lenta desgaseificação (a) ocorre à pressões sonoras de amplitude 0,25 atm. As grandes bolhas visíveis formadas não produzem som em um hidrofone. Uma vez produzidas, essas bolhas permanecerão após o campo sonoro ser encerrado.

Se a amplitude da pressão sonoras é elevada a 1,25 atm, bolhas muito menores são formadas (b), desaparecendo após o encerramento do ultra-som. Essas bolhas produzem sons detectáveis por hidrofones cujos ruídos possuem espectros contendo harmônicos e sub-harmônicos das frequência do som de excitação.

Em água cuidadosamente desgaseificada observa-se um terceiro fenômeno (c), diferente no aspecto supra-citados tipos de bolhas de gás. Esse fenômeno somente é produzido, e com bastante dificuldade, em óleo, benzeno e outros líquidos menos polares. À medida que a amplitude da pressão sonora é elevada para 4 atm (à 60 kcps), pequenas rupturas explosivas podem ser vistas em iluminação com luz negra.

Todos os três efeitos, desgaseificação lenta, e cavitação dos tipos vapor e gasosa necessitam a presença de pequenas e freqüentemente invisíveis bolhas de gás no líquido. Quanto menor forem as bolhas, maiores serão suas pressões internas P_i devido ao efeito da tensão superficial, conforme a equação (13):

$$P_i = P_0 + \frac{2\sigma}{R} \quad (13)$$

Onde:

P_0 = pressão hidrostática

σ = tensão superficial

R = raio da bolha

Essa alta pressão interna tende a forçar o gás de dentro das bolhas para a solução no líquido. A menos que um líquido esteja super-saturado com gás, não pode conter gás na forma de bolhas estáveis. Toda a evidência experimental indica, entretanto, que os líquidos reais possuem pontos fracos na forma de pequenas bolhas.

1.5.2. Os geradores

Os geradores de ultra-som são, essencialmente, osciladores de alta-tensão como aqueles utilizados em emissoras de rádio e televisão.

O principal objetivo com o uso de tais geradores é produzir oscilações de suficiente alta-frequência a uma tensão de alta rádio-frequência. No início, Langevin utilizou um arco de alta-frequência (Poulsen) para esse gerador. Com o tempo, tal procedimento passou a ser superado pelos osciladores (modelo tubo de vácuo).

Para aplicações em ar ou gases, um oscilador Pierce pode ser empregado. Isso significa que um cristal é utilizado tanto como gerador de ondas ultra-sônicas quanto aparelho de controle de frequência. No caso de líquidos ou sólidos, o quartzo oscilante não consegue manter suas próprias oscilações e o controle da frequência ao mesmo tempo.

Os geradores podem ser feitos para trabalhar com frequência de 20.000 até quase qualquer outra requerida, mas a quantidade de força disponível a partir de geradores de alta-frequência é menor porque as placas de quartzo tornam-se muito finas. Por essa razão, a maior parte dos aparelhos disponíveis trabalha em frequências menores que megaciclos.

A frequência de geração pode ser controlada pelo cristal ou produzida por quaisquer tipos de osciladores variáveis. Espirais podem ser usadas para acoplarem o cristal ao oscilador com o intuito de elevar a tensão a um valor suficientemente alto.

Os transdutores piezoelétricos, aparelhos que convertem energia elétrica em tensões mecânicas, são os mais utilizados atualmente, especialmente para

frequências entre 0,1 e 1 mc. Sistemas magnetostrictivos para faixas abaixo disso (até 50.000 ciclos), nas quais o tamanho do transdutor torna-se muito pequeno ou de difícil manuseamento. Os cristais para esse propósito são de cerca de 75 mm de diâmetro e entre 7 e 14 mm de espessura (para frequências entre 0,1 e 0,3 mc).

O transdutor normalmente é acoplado ao oscilador através de um transformador ou espira Tesla. A saída do oscilador deve ser a maior possível e é frequentemente de centenas de watts.

2. Objetivos

O presente trabalho objetiva estudar métodos de recuperação de moldes poliméricos utilizados em colagem de barbotina para a produção peças cerâmicas sanitárias. Para tanto, analisaram-se os mecanismos de obstrução dos poros, a natureza de tais partículas e a utilização do banho de ultra-som como solução alternativa.

3. Materiais e métodos

3.1. Materiais utilizados

O material utilizado foi fornecido pela Incepa e se constitui de partes de moldes poliméricos utilizados na fundição (colagem) de peças cerâmicas sanitárias.

Para a realização da análise e conseqüente verificação dos resultados decorrentes do banho com ultra-som, o molde foi inicialmente cortado longitudinalmente utilizando, para tanto, uma serra de fita. Em seguida, retiraram-se as amostras, assumindo, em média, uma profundidade de 12 mm a partir da superfície.

O procedimento adotado segue a seqüência apresentada na figura 6:

- 1- Molde inteiro
- 2- Corte longitudinal
- 3- Obtenção de uma parte da camada superficial
- 4- Vista em detalhe da camada superficial
(a região mais escura representa os poros obstruídos)
- 5- Peça a ser examinada
- 6- Secagem das peças após lavagem

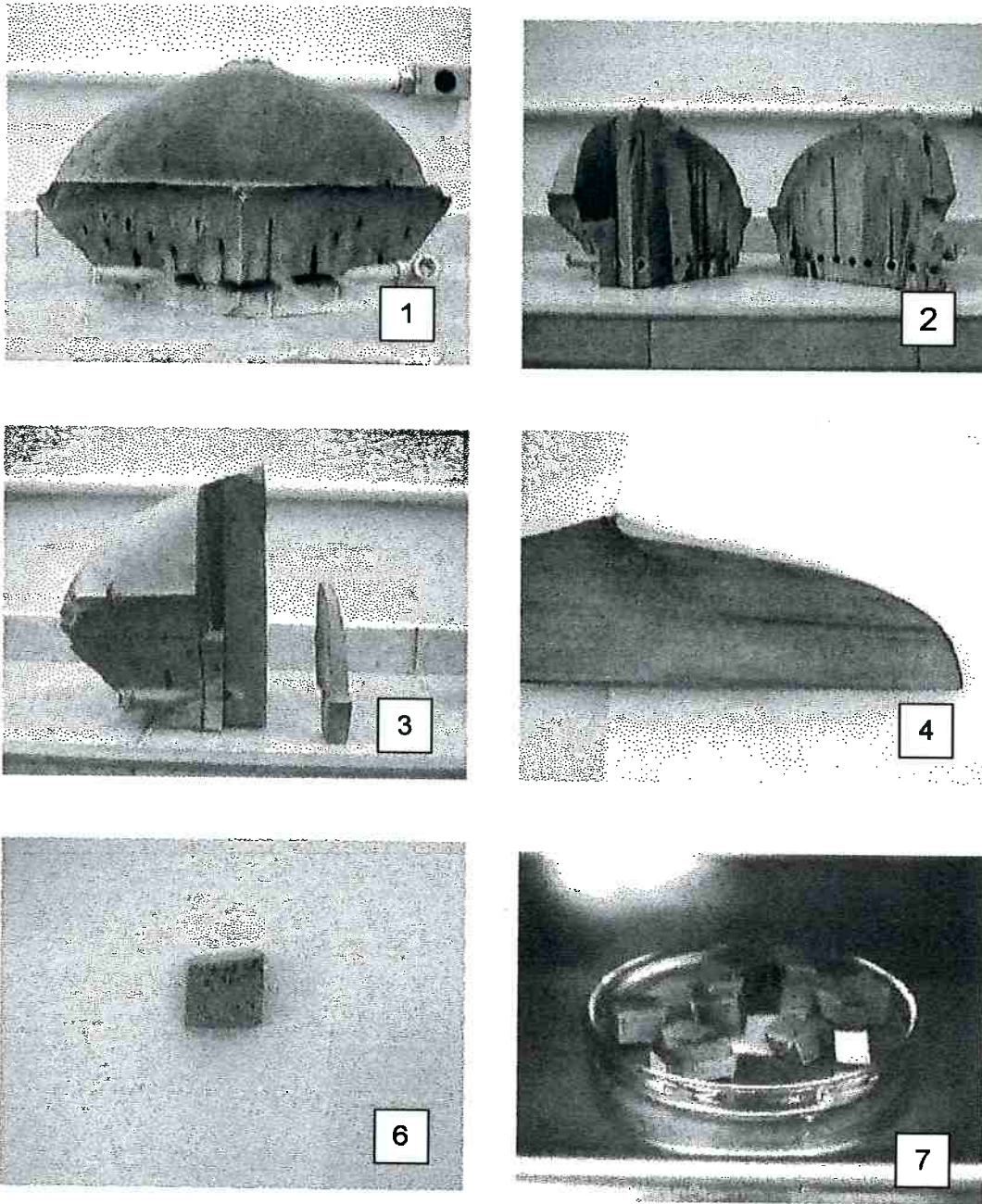


Fig. 6 – Seqüência de preparação das amostras

O ultra-som (equipamento da marca THORNTON, potência 200 W), com uma frequência de 60 Hz, foi aplicado em dois grupos de amostras. No primeiro caso, uma vez lavadas, as amostras foram colocadas em béqueres de 50 mL, imersos em água deionizada e submetidas ao banho em tempos crescentes, conforme apresentado abaixo:

Amostra	Tempo de ultra-som (minutos)
1	0
2	9
3	18
4	27
5	36
6	45
7	54

Por fim, cada amostra foi secada a 45 °C durante, no mínimo, 24 h. Os béqueres contendo os resíduos em suspensão com água deionizada foram colocados em estufa durante, no mínimo, 24 h para a completa secagem e posterior análise em MEV.

O segundo grupo teve todas as faces, menos aquela pertencente originalmente à superfície do molde, recobertas com selante de silicone (marca Flexite), com o intuito de avaliar a ação do banho de ultra-som em condições mais próximas às condições em que seria efetuada a lavagem do molde, uma vez que somente a superfície estará em contato com o líquido durante o banho. O tempo da ação do ultra-som, nesse caso, foi de 9 minutos por amostra. Foram analisadas três amostras, submetidas a 9, 18 e 27 minutos de ultra-som, respectivamente.

3.2. Porosimetria de mercúrio

A realização dos ensaios de porosimetria foi realizada no aparelho AutoPore III, da MICROMETRICS, em duas etapas: baixa e alta pressão.

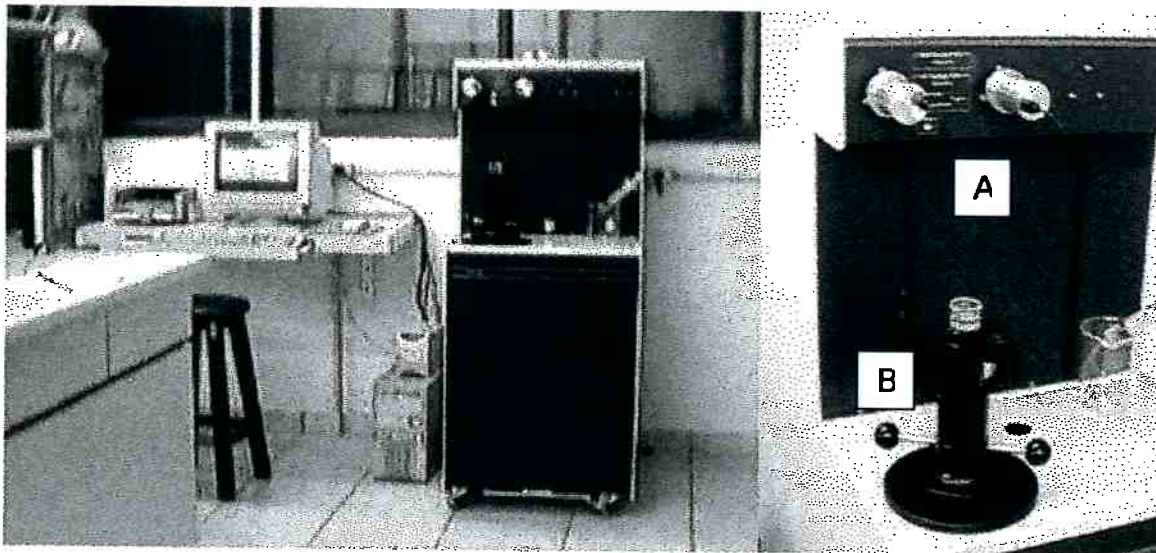


Fig. 7 – À direita, porosímetro acoplado ao computador, à esquerda, vista em detalhe, com os terminais para medida em baixa pressão (A) e alta pressão (B)

A porosimetria do mercúrio é baseada na lei capilar que governa a penetração dos líquidos em pequenos poros. Essa lei, no caso de líquidos que não molham as amostras, como é o caso do mercúrio em relação aos poros cilíndricos, é expressa pela equação de Washburn:

$$D = - (1/P) 4\gamma \cos\phi \quad (14)$$

Onde:

D = diâmetro do poro

P = pressão aplicada

γ = tensão superficial

ϕ = ângulo de contato

O volume de mercúrio V que penetrante nos poros é medido diretamente como função da pressão aplicada. Essa informação P-V é utilizada como a principal forma de caracterização da estrutura.

Os poros raramente são cilíndricos, assim, a equação acima constitui-se num modelo especial. Tal modelo pode não se caracterizar como a melhor maneira de se representar os poros em materiais verdadeiros; entretanto, seu uso geralmente é aceito como uma maneira prática de tratar o que, de outra forma, tornar-se-ia um problema mais complexo.

A tensão superficial do mercúrio varia com a pureza e o valor geralmente recomendado é de 485 dyna/cm. O ângulo de contato entre o mercúrio e o sólido que contém os poros varia com a composição do sólido, entretanto, um valor de 130 graus é recomendado na ausência de informações específicas contrárias.

A extrusão do mercúrio dos poros sob redução da pressão está em concordância geral com a equação (14), embora os diâmetros dos poros indicados sejam sempre maiores do que os valores reais. Isso resulta de valores equivalentes de mercúrio extrudado a pressões menores que aquelas nas quais os poros foram preenchidos. Também é comum observar-se que os poros verdadeiros sempre "aprisionam" o mercúrio. O primeiro fenômeno frequentemente é atribuído aos ângulos de contato recuados, sendo menores que os avançados. O segundo é provavelmente devido à irregularidades dos poros, dando vazão a crescentes aumentos de câmaras e às estruturas "tinteiro" (*"ink-well"*). Esses fenômenos ocasionam a histerese, i.e., intrusão e extrusão distintas em curvas P-V.

3.3. Granulometria

O granulômetro utilizado nas análises de tamanho de partículas é da marca MALVERN, o qual baseia-se na difração do laser, também conhecido como espalhamento da luz. Ambos situam-se na categoria dos sistemas ópticos sem imagem ("Non Imaging Optical Systems").

A luz proveniente de um laser hélio-neônio de baixo poder é usada para formar um feixe de luz colimado e monocromático como o feixe analisador e quaisquer partículas presentes espalharão essa luz laser. A grande vantagem da difração a laser em relação a outras técnicas de contagem de partículas deve-se ao fato de que cada varredura mede de centenas a milhares de partículas, de forma que medidas aceitáveis acabam levando menos de trinta segundos.



Fig. 8 – Acima, granulômetro a laser, ao lado, o porta-amostras em detalhe

4. Resultados

Neste trabalho, o problema foi analisado através da identificação das causas de obstrução dos poros, da natureza das partículas envolvidas na obstrução e na avaliação da técnica de limpeza por ultra-som através da análise por perda de massa e porosimetria de mercúrio.

4.1. Natureza das partículas

Uma análise preliminar utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostrou que as partículas responsáveis pela obstrução dos poros são alumino-silicatos, ou seja, matéria-prima da barbotina.

A micrografia 9 mostra um molde utilizado em poucas colagens enquanto a 10 apresenta um molde após o fim de seu ciclo útil de aproveitamento. Na figura 11, o espectro revela a natureza das partículas mais claras, responsáveis pela obstrução dos poros. Da mesma forma, nenhum material orgânico foi observado nessas regiões.

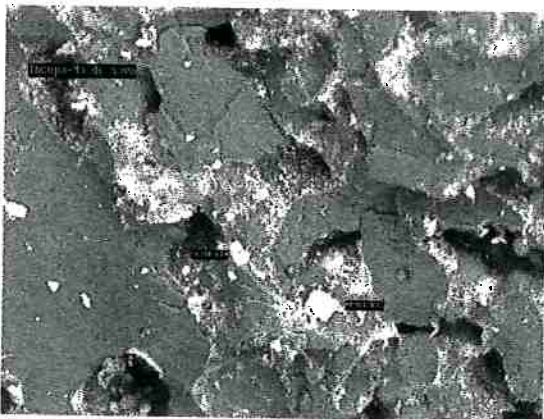


Fig. 9 – Molde poucas vezes utilizado (800 X)

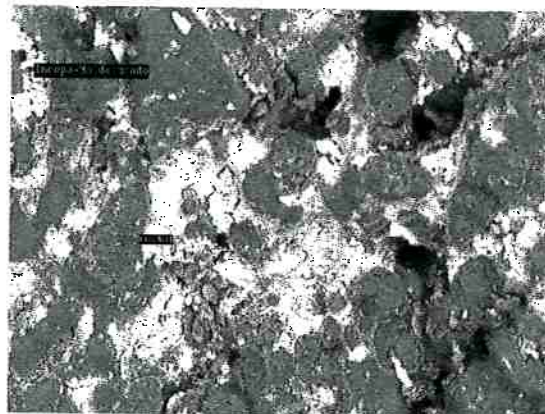


Fig. 10 – Molde com ciclo de colagens esgotado (800 X)

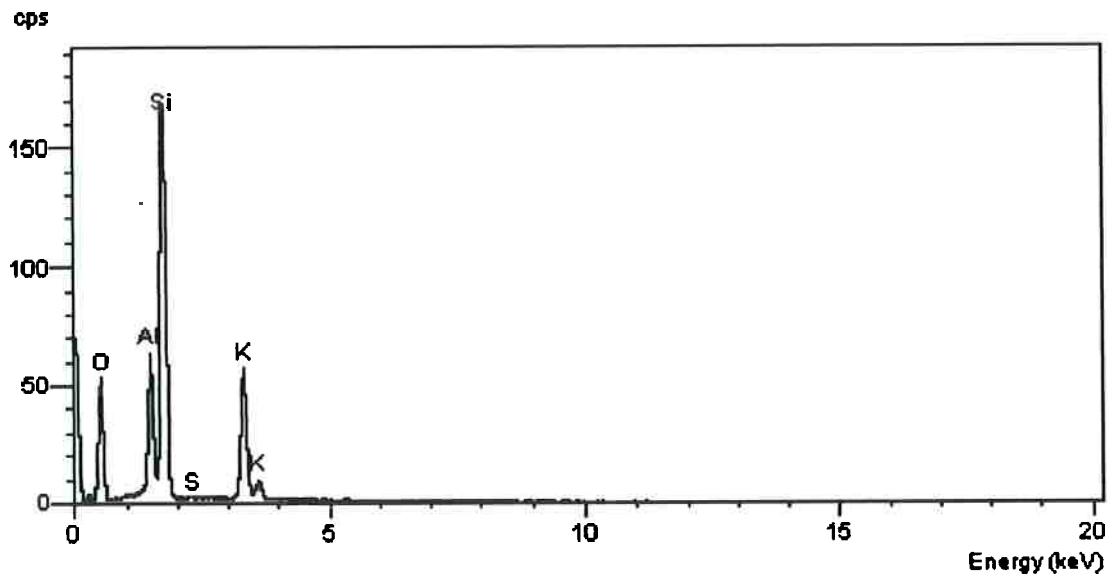


Fig. 11 - Identificação de alumino-silicatos como partículas responsáveis pela obstrução dos poros

4.2. Avaliação da limpeza por ultra-som

O primeiro teste realizado levou em consideração a realização de banhos com ultra-som em tempos progressivos. Em seguida, analisou-se a diferença, em peso, entre as massas do resíduo e da amostra inicial, com o intuito de se avaliar o resultado da desobstrução. Os resultados mostram uma tendência crescente de obtenção de resíduos para aumentos sucessivos do tempo de exposição da amostra ao ultra-som, conforme pode constatar-se na tabela 1:

Amostra	Tempo de ultra-som (s)	Antes (g)	Depois (g)	Resíduo (g)	Resíduo/Amostra (%)
1	0	1.38	1.38	0.00E+00	0.00
2	10	1.49	1.48	1.13E-02	0.76
3	20	1.43	1.42	1.51E-02	1.06
4	30	1.47	1.46	1.84E-02	1.25
5	40	1.22	1.21	1.55E-02	1.27
6	50	2.19	2.14	4.95E-02	2.26
7	60	1.70	1.67	3.48E-02	2.04

Tabela 1: Porcentagem de resíduo removido em função do tempo de exposição ao ultra-som

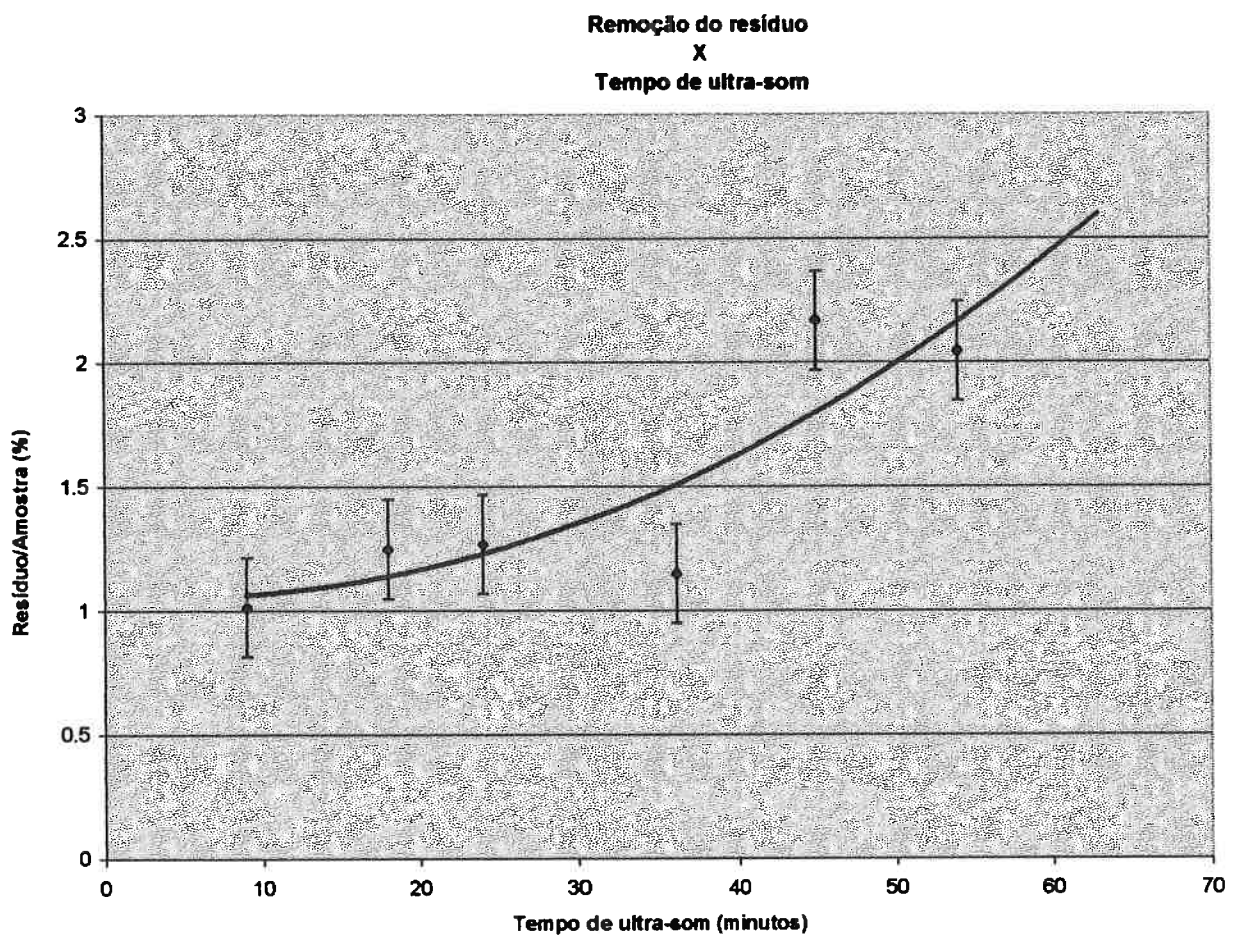


Fig. 12 – Representação gráfica dos dados da tabela 1

4.3. Porosimetria de mercúrio

O objetivo da análise com porosimetria foi o de comparar a porosidade dos moldes após o fim de sua vida útil e posteriormente submetidos ao tratamento com ultra-som e o molde em condições de uso.

As amostras preparadas para a porosimetria tiveram todas as faces menos uma – pertencente a superfície do molde – isoladas com silicone. Foram obtidos os seguintes valores:

Amostra	Tempo de ultra-som (s)	$D_{\text{médio}}$ do poro (μM)	Vol. de intrusão (mL/g)	Porosidade (%)
1	0	19,02	0,21	19,70
2	9	19,81	0,22	19,85
3	18	20,62	0,24	21,52
0	*	26,38	0,32	26,83

* Amostra extraída de molde sem uso

Tabela 2: Valores obtidos com a porosimetria de mercúrio

Os resultados permitem concluir que, à medida que se aumenta o tempo de aplicação do ultra-som, conseguem-se valores crescentes de porosidade, diâmetro médio dos poros e volume de intrusão (quantidade de mercúrio que penetra nos poros em termos de volume por massa de amostra), tendendo a aproximarem-se das análises feitas dos moldes não utilizados, evidenciando-se, dessa forma, a eficácia do método proposto na desobstrução dos poros.

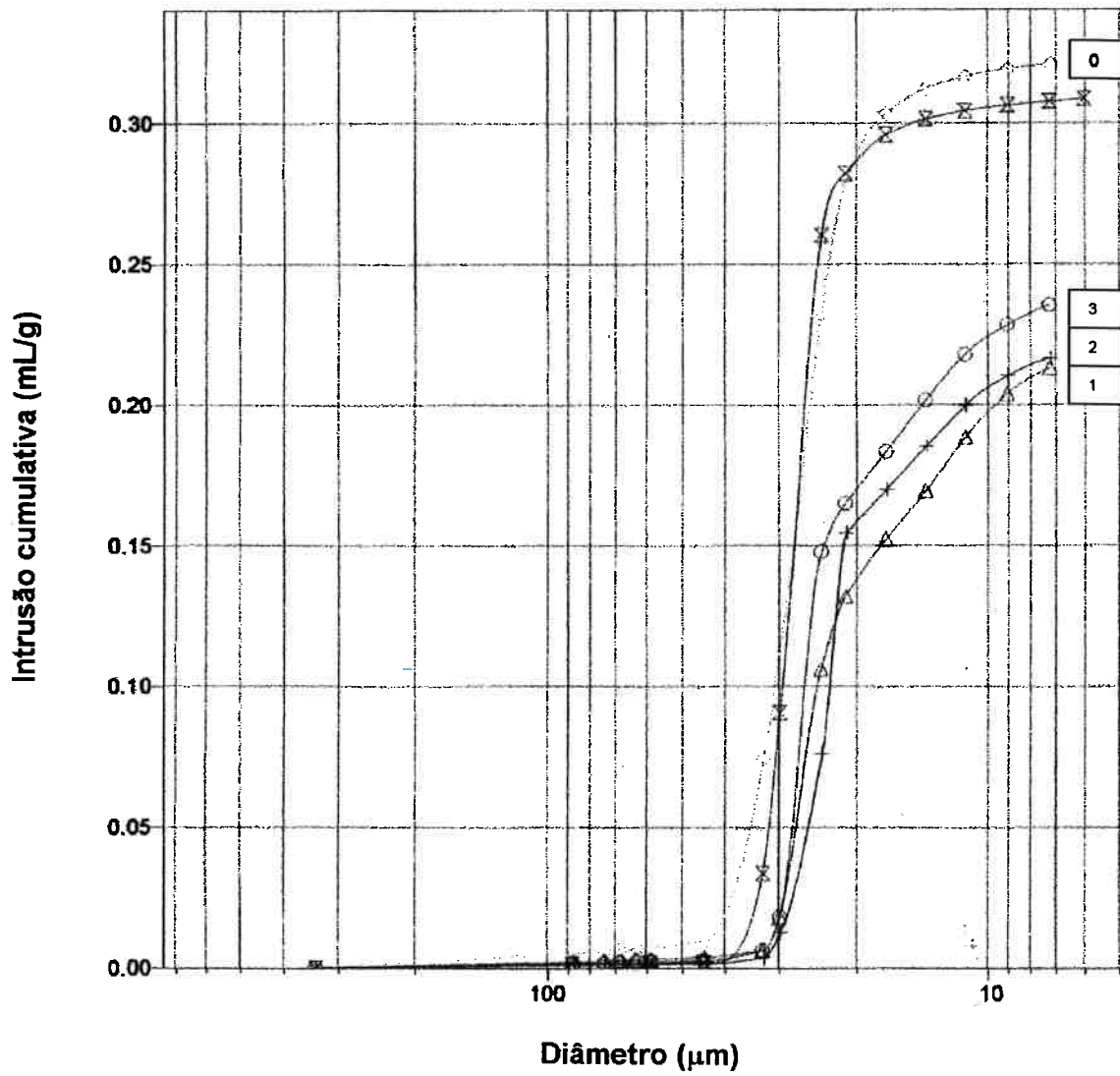


Fig. 13 – Intrusão cumulativa em função do diâmetro

4.4. Análise do resíduo

A Análise do resíduo química do resíduo foi feita com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Stereoscan 440, resolução 101 eV.

Uma análise qualitativa inicial mostrou uma presença preponderante de oxigênio, alumínio e silício, o que pode ser observado na figura 14.

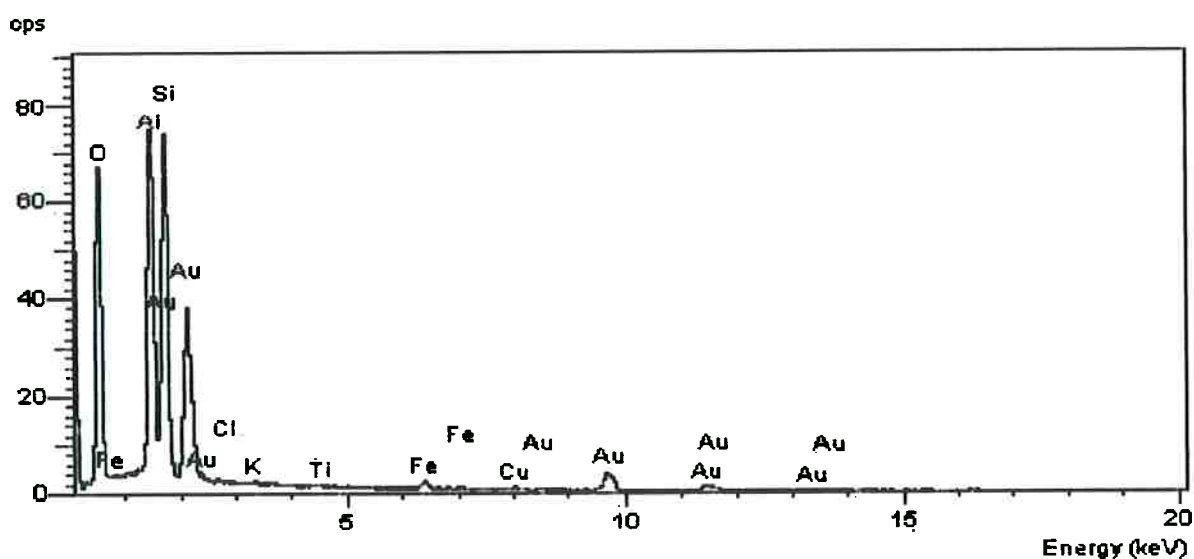


Fig. 14 – Análise por EDS na qual se observa uma presença significativa de átomos de oxigênio, silício e alumínio (a presença de ouro deve-se à preparação do resíduo para a análise de MEV)

Na análise química por EDS, foram observadas duas regiões distintas nas partículas do resíduo, uma parte mais clara (fig. 15), e outra mais escura (fig. 16). Nessas duas regiões foram realizadas as seguintes análises semi-quantitativas:

1) Análise da região escura

Elemento	% Elemento	% Atômica
O	44.04	58.98
Al	21.16	16.80
Si	28.41	21.67
Cl	0.10	0.06
K	0.34	0.19
Ti	0.60	0.27
Fe	4.69	1.80
Cu	0.66	0.22

2) Análise da região clara

Elemento	% Elemento	% Atômica
O	35.87	50.31
Al	4.62	3.85
Si	55.36	44.23
Cl	0.01	0.00
K	0.39	0.22
Fe	1.17	0.47
Cu	2.58	0.91

Os elementos detectados foram aqueles presentes nas matérias-primas originais e suas quantidades concentraram-se na faixa esperada.

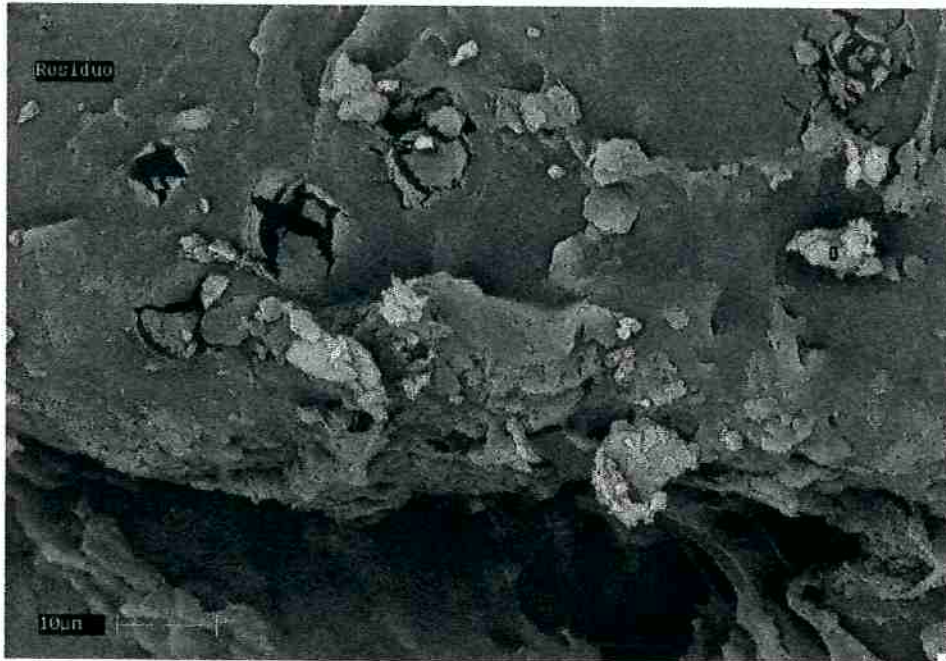


Fig. 15 – Região clara

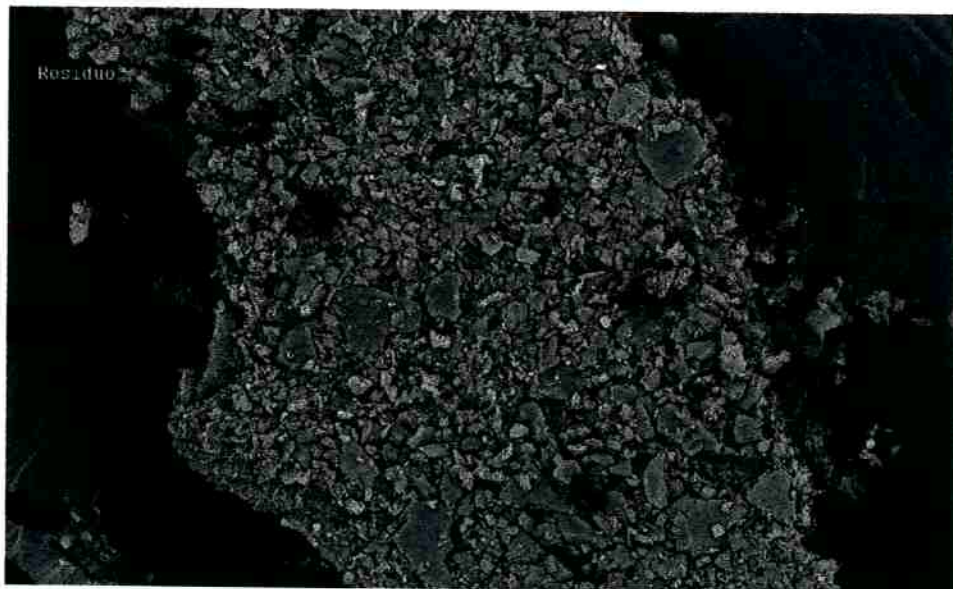


Fig. 16 - Região escura

4.5. Análise do tratamento de ultra-som a partir das micrografias

Foram obtidas três micrografias de diferentes amostras, conforme pode-se observar na figura 17, onde:

- 1 – Parte do molde com ciclo de vida útil esgotado, antes do ultra-som.
- 2 – Parte do molde com ciclo de vida útil esgotado, após o ultra-som (9 minutos)
- 3 – Molde submetido a poucas colagens.

A comparação entre as imagens 1,2 e 3 (fig. 17) permite observar uma desobstrução considerável dos poros com o tratamento utilizado. Da mesma forma, pode-se dizer que a quantidade de partículas claras, responsáveis pela obstrução dos poros, ainda é bastante grande quando considerado o molde quase sem uso.

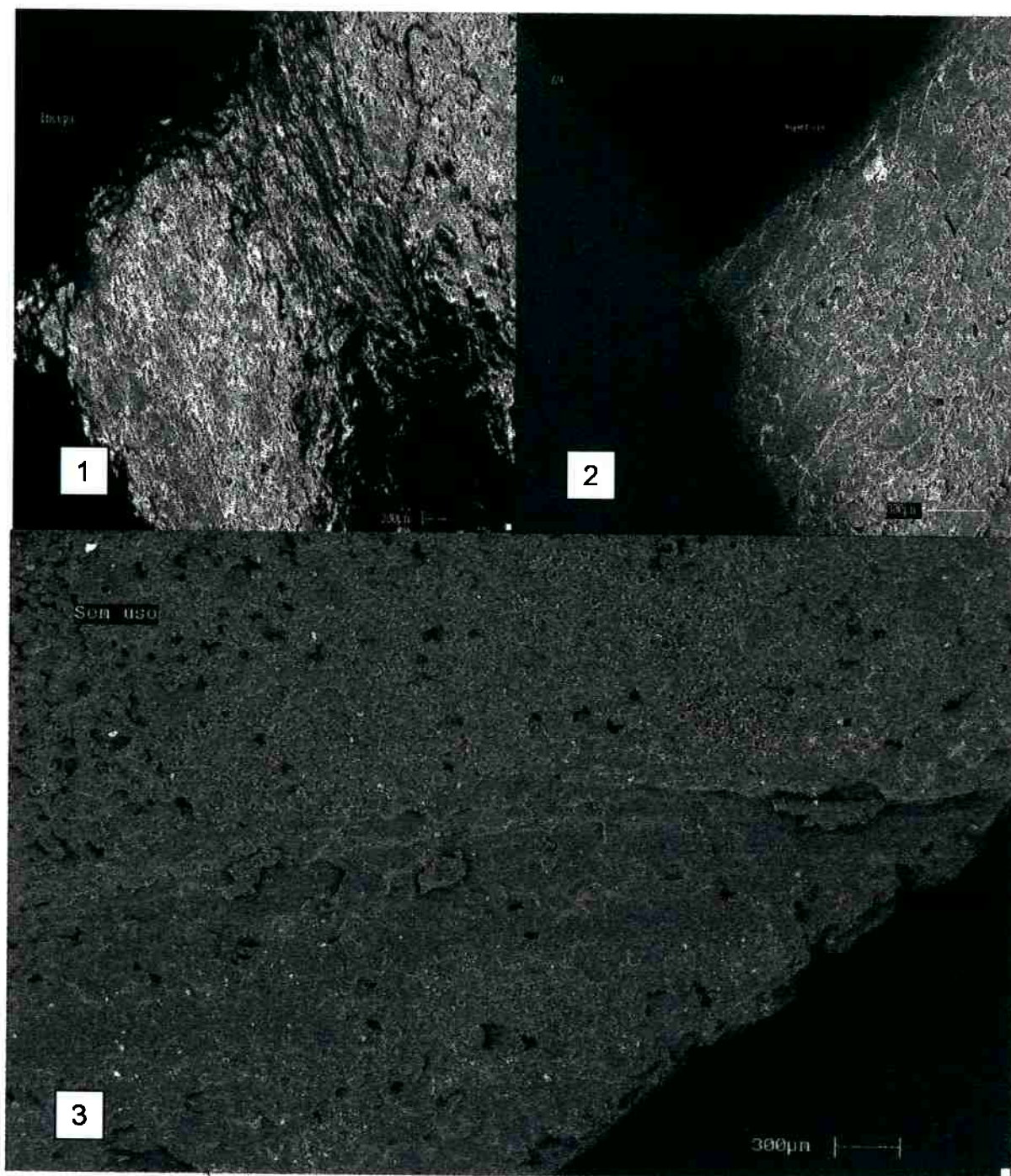


Figura 17 - As micrografias acima permitem a comparação entre os moldes com ciclo de colagens esgotado (1), após 9 minutos de ultra-som (2) e em condições ideais e poucas colagens (3).

4.6. Análise granulométrica

As análises granulométricas representadas acima foram realizadas no granulômetro a laser MALVERN SB.0B. O diâmetros médios das partículas aferidas foi o seguinte:

Barbotina	9,79 μm
Resíduo	7,98 μm

Os valores bastante próximos, assim como a semelhanças entre as curvas obtidas, mostram que as partículas responsáveis pela obstrução dos poros apresentam as mesmas características da barbotina, ou seja, não são os "finos", e tampouco as partículas de maior granulometria, os principais responsáveis pelo fim da vida útil dos moldes.

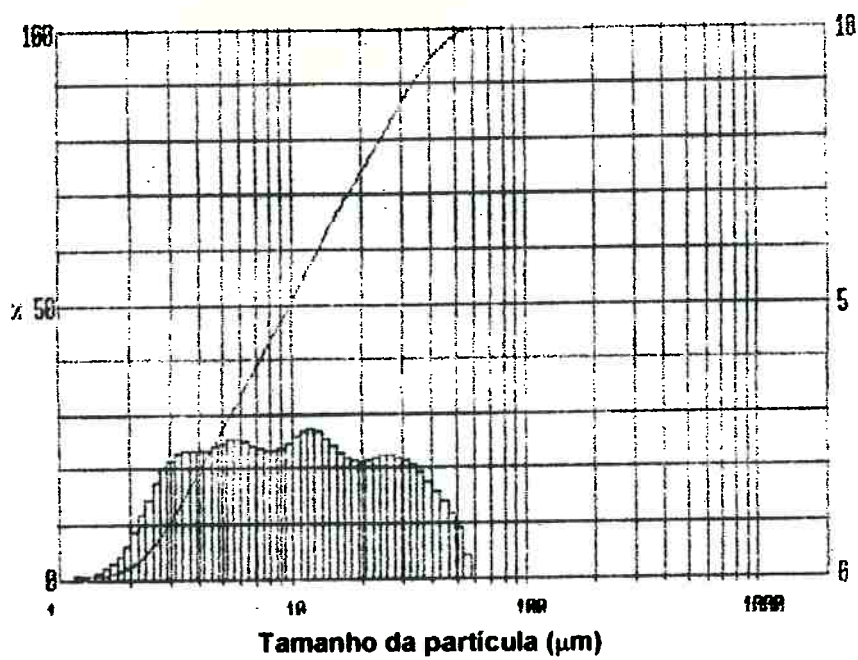


Fig. 18 – Análise granulométrica da barbotina

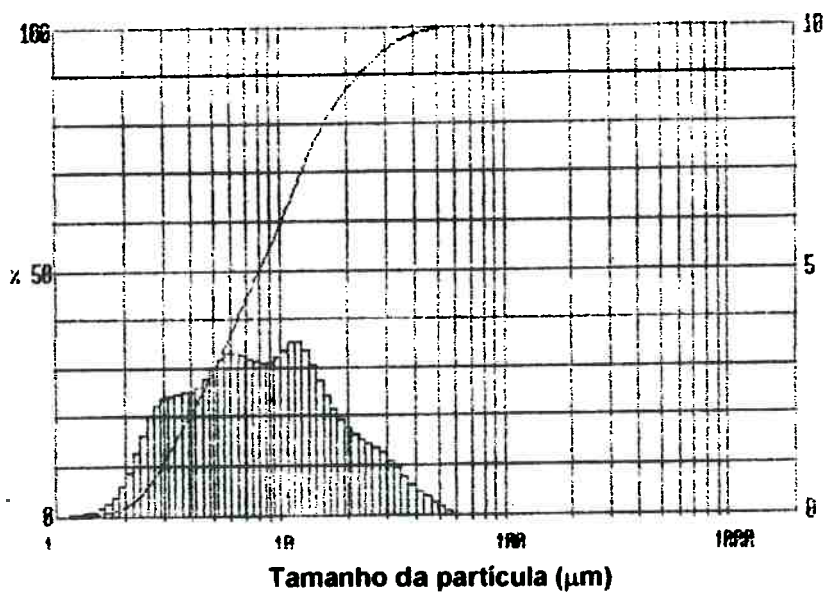


Fig. 19 - Análise granulométrica do resíduo

5. Viabilidade econômica do tratamento

Uma vez considerada a possibilidade de utilização do ultra-som como forma de recuperação dos moldes poliméricos, partiu-se para um estudo de viabilidade econômica de tal tratamento.

Em função dos elevados custos para a produção dos moldes poliméricos, orçados com preço de custo em torno de US\$ 3.500,00, a alternativa proposta pareceu configurar-se atraente. Segundo um dos fabricantes (UNIC, tel. 5182-5152), um modelo com tanque de 75 litros, custa R\$ 6.000,00, o equivalente a US\$ 3.000,00. Embora no presente estudo não se tenha avaliada a extensão do prolongamento do número de colagens após o tratamento com ultra-som, o baixo investimento em novo equipamento, em complemento à eficácia do método, justificaria a utilização do procedimento proposto.

6. Conclusões

Os resultados obtidos com a realização deste trabalho podem ser sintetizados nas seguintes observações:

- As partículas responsáveis pela obstrução dos poros são essencialmente alumino-silicatos, ou seja, da mesma natureza daquelas que compõem a barbotina;
- Ao se submeterem partes dos moldes à ação dos banhos de ultra-som, verificou-se uma sensível desobstrução dos poros;
- Quanto maior o tempo de exposição ao ultra-som, maior a quantidade de resíduo obtida;
- A porosimetria de mercúrio revelou que para tempos crescentes de utilização do ultra-som, valores também crescentes de porosidade e diâmetro dos poros são obtidos;
- O resíduo analisado mostrou-se composto apenas de alumino-silicatos, ou seja, sem danificar o molde;
- A análise granulométrica do resíduo apresentou as mesmas características da barbotina o que indica não serem os "finos" os principais responsáveis pela obstrução;
- A viabilidade econômica do projeto pode ser inferida em decorrência dos elevados custos de produção do molde, tornando atrativas formas de prolongamento de sua utilização como o banho de ultra-som;

7. Sugestões para trabalhos futuros

Como complemento ao trabalho desenvolvido, sugere-se um estudo mais aprofundado dos aspectos ligados ao efeito da cavitação no molde e a aplicação de banhos de ultras-som em moldes inteiros recém-retirados de operação, com o intuito de se verificar, na prática, o prolongamento da vida útil do molde segundo o método proposto.

8. Bibliografia

1. Blanchard, E. G.; *Pressure Casting Improves Productivity*, Ceramic Bulletin, vol. 67, n° 10, 1988.
2. Ates, R.; *A New Technology in Sanitaryware Production: High-Pressure Casting*; Interceram, vol. 45, n° 6, 1996.
3. Plaster Mold Casting Association; *The Plaster Mold Casting Handbook*; P.M.C.A.; New York; 1983.
4. Buckleiter, E. L.; *DuBois and Pribble's Plastics Mold Engineering Handbook* (ed. por Eric L. Buckleitner) ; Chapman & Hall; New York; 1995.
5. Richerson D.W.; *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing and Use in Design*; 2 ed.; Marcel Drekker inc.; New York; 1992.
6. Rado, P.; *An Introduction to the Technology of Pottery*; 2 ed., Pergamon Press; London; 1988.
7. Reed, J.S.; *Principles of Ceramic Processing*; Wiley; New York; 1988.
8. Hueter, T.F.; Bolt, R.H.; *Sonics – Techniques for the Use of Sound and Ultrasound in Engineering and Science*; Jonh Wiley & Sons; New York; 1955.
9. Rosenberg, M. D.; *Tech. Mem. 25 (Aug. 8th)*, Harvard University Acoustics Research Laboratory; 1952. Lange, T.; *Acustica*, 2, AB 75; 1952.
10. AutoPore III – Operator's Manual; Micrometrics; 1998.